Vulnérabilité des bâtiments dans les zones sismiques

1. VULNÉRABILITÉ, HASARD, RISQUE

La *vulnérabilité* d'un système soumis à des actions agressives est une grandeur directement liée à la prédisposition intrinsèque du système à subir des dommages provoqués par ces actions.

La vulnérabilité peut s'exprimer par une courbe dans un diagramme où les abscisses indiquent une mesure de l'intensité des actions et les ordonnées le niveau des dommages par rapport à la perte totale (destruction) du système (Fig. 1).

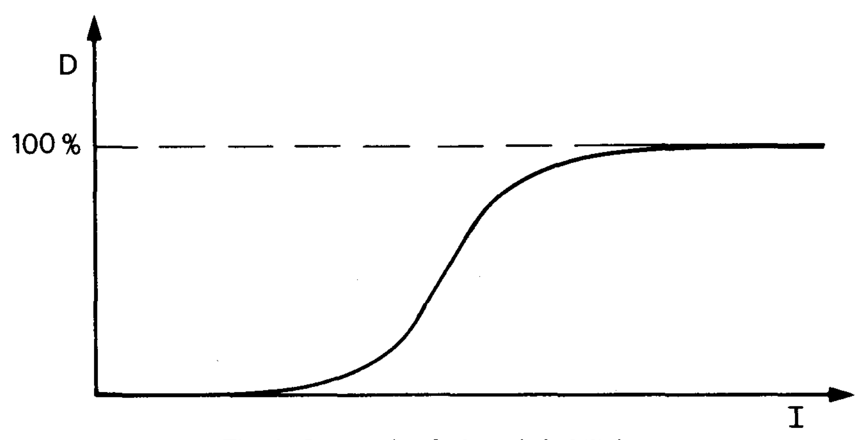


Fig. 1. La courbe de la vulnérabilité.

En particulier le système peut être une construction, un bâtiment, et les actions peuvent être par exemple exprimées en degrés Mercalli (MCS) ou bien Mercalli modifié (MM) ou encore selon l'échelle russe (MSK).

Les dommages peuvent être définis en termes économiques, ou bien comme nombre de victimes (morts et blessés).

La possibilité que les actions sismiques se réalisent avec une certaine intensité et une certaine fréquence dans une région donnée définit ce que l'on appelle risque naturel ou *hasard.*

La présence de constructions et d'ouvrages de l'homme en général dans une région sismique comporte, à cause de la vulnérabilité de ces ouvrages aux actions sismiques, un *risque sismique* qui dépend, évidemment, de la combinaison des deux facteurs hasard et vulnérabilité, plus un troisième facteur qui s'appelle *exposition*, lié à la valeur et au nombre des ouvrages existants.

Le *risque sismique* peut se définir[1] comme : « la probabilité que les conséquences sociales ou économiques des tremblements de terre puissent rejoindre ou dépasser des valeurs assignées dans une localité, plusieurs localités, ou bien une région, pendant une période de temps assignée ».

Au point de vue général, les concepts rappelés ci-dessus s'appliquent également au patrimoine culturel, mais naturellement il est plus difficile, ou même impossible, d'obtenir des formulations quantitatives, car la définition de la *valeur* et l'estimation des dommages sont très difficiles à établir.

Les difficultés n'enlèvent pas sa valeur au cadre théorique et en particulier la définition de vulnérabilité et la recherche de méthodes pour évaluer cette grandeur sont très importantes.

2. Vulnérabilité du patrimoine culturel

Le patrimoine culturel soumis au risque sismique est varié ; nous pouvons, au point de vue de la vulnérabilité, le diviser en trois catégories :

a. les *monuments*, caractérisés par des typologies constructives « spéciales » (par rapport aux bâtiments ordinaires), comme églises, châteaux, etc... ;
b. les *musées*, définis comme des constructions n'ayant pas une valeur intrinsèque (sinon économique et s'ils ne sont pas eux mêmes des monuments), mais qui contiennent un patrimoine culturel, représenté par les objets qui sont gardés dans le musée ;
c. les *tissus urbains* anciens, où la valeur est donnée par l'ensemble des constructions, même si chaque bâtiment n'est pas, tout seul, un monument.

Pour les monuments l'évaluation de la vulnérabilité est assez difficile, à cause de la complexité des typologies constructives, et nous ne disposons pas encore, en ce moment, de méthodes bien établies.

Pour les catégories b et c, c'est-à-dire pour les bâtiments ordinaires, le problème est un peu plus facile et surtout mieux connu et étudié jusqu'à maintenant.

1. E.E.R.I. (Earthquake Engineering Research Institute), Committee on Seismic Risk, *Glossary of Terms for Probabilitistic Seismic Risk and Hazard — Earthquake Spectra*, vol. 1, n° 1, nov. 1984.

2.1. Vulnérabilité des bâtiments (ordinaires)

La première décision à prendre, quand on veut évaluer la vulnérabilité d'un certain nombre de bâtiments, concerne le *niveau* de complexité de l'analyse que l'on veut ou que l'on peut faire.

Si le nombre des bâtiments est petit, si la compétence des personnes qui effectuent l'analyse est grande, si le temps disponible est long, si les moyens assignés sont abondants, et enfin si cela en vaut la peine, alors on peut faire une étude très riche, détaillée, complète, au niveau maximum possible.

Si, au contraire, on veut étudier des milliers de bâtiments en peu de temps, en employant des personnels pas nécessairement très experts et sans trop dépenser, il faut alors adopter un niveau d'analyse plus bas, évidemment moins riche d'informations, mais avec l'exigence très importante que les résultats soient le plus possible objectifs et uniformes (comme niveau et approximation) entre eux.

C'est la deuxième situation qui nous intéresse et en ce cas on peut distinguer trois niveaux, dont les plus importants sont le 1 et le 2.

Les méthodes d'analyse, à cause des exigences d'uniformité et d'élaboration, s'organisent au moyen de fiches à remplir pour chaque bâtiment, en suivant un manuel d'instructions très détaillé et précis.

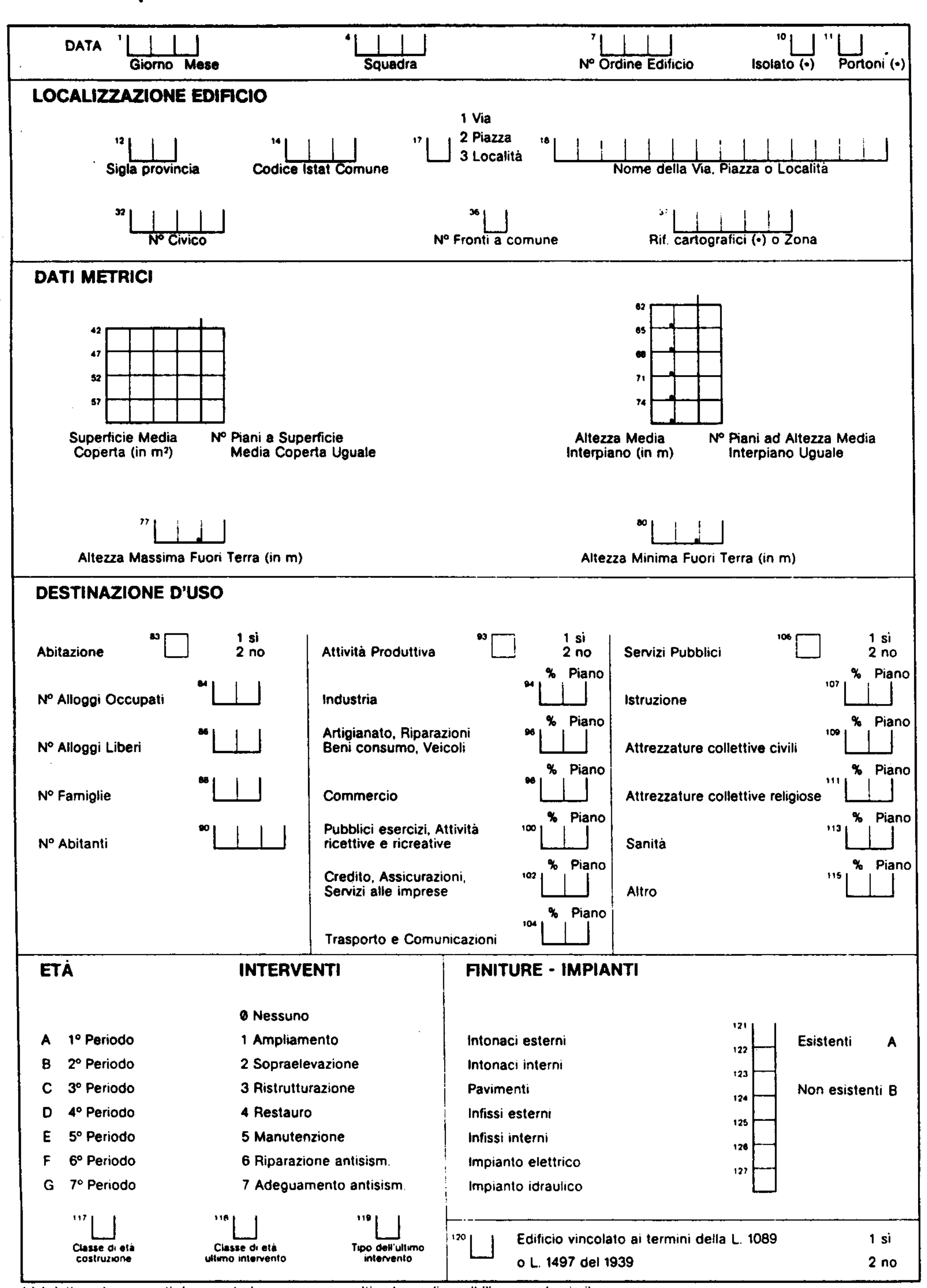
En Italie les niveaux 1 et 2 ont été définis et expérimentés par le « Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti » (GNDT), qui fait partie du CNR (Conseil National des Recherches). Les analyses concernent les bâtiments en maçonnerie et en béton armé mais nous parlerons ici seulement de la maçonnerie.

2.1.1. Niveau 1

Les deux premières pages de la fiche du GNDT concernent le niveau 1. La première page, en particulier (fig. 2) contient les informations générales sur le bâtiment, comme l'adresse, des données d'exposition (par exemple la surface) ou bien (ou en même temps) des données de vulnérabilité (hauteur, nombre des étages, etc). Parmi les éléments de cette page, qui en général est assez facile à lire, on peut signaler :

— les codes 10 et 11, au moyen desquels on essaye d'obtenir des informations sur la définition du bâtiment ; en effet cette définition n'est pas toujours facile, sauf dans le cas de maison isolée. Par contre les tissus urbains anciens posent souvent des problèmes assez difficiles à ce sujet, avec la possibilité que des opérateurs différents adoptent des solutions différentes pour la division d'un « agrégat structurel » en plusieurs bâtiments ;

— le code 36 concerne encore le même problème ;



GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DAI TERREMOTI (G.N.D.T.) - C.N.R.
Scheda di Esposizione e Vulnerabilità di 1° livello - Censimento Danni **1ª Parte**

DATA 1 Giorno Mese — 4 Squadra — 7 N° Ordine Edificio — 10 Isolato (•) — 11 Portoni (•)

LOCALIZZAZIONE EDIFICIO

12 Sigla provincia — 14 Codice Istat Comune — 17 1 Via 2 Piazza 3 Località — 18 Nome della Via, Piazza o Località

32 N° Civico — 36 N° Fronti a comune — 37 Rif. cartografici (•) o Zona

DATI METRICI

42, 47, 52, 57 — Superficie Media Coperta (in m²) — N° Piani a Superficie Media Coperta Uguale

62, 65, 68, 71, 74 — Altezza Media Interpiano (in m) — N° Piani ad Altezza Media Interpiano Uguale

77 Altezza Massima Fuori Terra (in m) — 80 Altezza Minima Fuori Terra (in m)

DESTINAZIONE D'USO

Abitazione	83	1 si 2 no	Attività Produttiva	93	1 si 2 no	Servizi Pubblici	106	1 si 2 no
N° Alloggi Occupati	84		Industria	94	% Piano	Istruzione	107	% Piano
N° Alloggi Liberi	86		Artigianato, Riparazioni Beni consumo, Veicoli	96	% Piano	Attrezzature collettive civili	109	% Piano
N° Famiglie	88		Commercio	98	% Piano	Attrezzature collettive religiose	111	% Piano
N° Abitanti	90		Pubblici esercizi, Attività ricettive e ricreative	100	% Piano	Sanità	113	% Piano
			Credito, Assicurazioni, Servizi alle imprese	102	% Piano	Altro	115	% Piano
			Trasporto e Comunicazioni	104	% Piano			

ETÀ

A 1° Periodo
B 2° Periodo
C 3° Periodo
D 4° Periodo
E 5° Periodo
F 6° Periodo
G 7° Periodo

INTERVENTI

0 Nessuno
1 Ampliamento
2 Sopraelevazione
3 Ristrutturazione
4 Restauro
5 Manutenzione
6 Riparazione antisism.
7 Adeguamento antisism.

117 Classe di età costruzione — 118 Classe di età ultimo intervento — 119 Tipo dell'ultimo intervento

FINITURE - IMPIANTI

121 Intonaci esterni
122 Intonaci interni
123 Pavimenti
124 Infissi esterni
125 Infissi interni
126 Impianto elettrico
127 Impianto idraulico

Esistenti A
Non esistenti B

120 Edificio vincolato ai termini della L. 1089 o L. 1497 del 1939 — 1 si 2 no

(•) I dati contrassegnati da un asterisco vanno raccolti solo se disponibili o quando sia il caso.

Fig. 2. Fiche pour le relevé de la vulnérabilité, 1ᵉ page : données générales.

G.N.D.T. - Scheda di Esposizione e Vulnerabilità di 1° livello - Censimento Danni 2ª Parte

DATA 128 (Giorno Mese) 131 (Squadra) 134 (N° Ordine Edificio) 137 (Isolato (•)) 138 (Porzioni (•))

TIPOLOGIA STRUTTURALE

Strutture Verticali

Mur. a secco	A
Mur. a secco con spigoli, mazzette e ricorsi	B
Mur. pietra sbozzata	C
Mur. pietra sbozzata con rinforzi c.s.	D
Mur. pietre arrotondate	E
Mur. pietre arrotondate con rinforzi c.s.	F
Mur. blocchetti tufo o pietra ben squadrata	G
Mur. blocchetti calc. inerti pesanti	H
Mur. blocchetti calc. inerti leggeri	I
Mur. mattoni pieni o multifori	L
Mur. mattoni forati	M
Pareti calc. non armato	N
Pareti calc. armato	O
Telai di c.a. non tamponati	P
Telai di c.a. con tamponature deboli	Q
Telai di c.a. con tamponature consist.	R
Ossatura metallica	S
Miste	T

Scale

Struttura appoggiata in legno	1
Struttura a sbalzo in legno	2
Struttura appoggiata in acciaio	3
Struttura a sbalzo in acciaio	4
Struttura appoggiata in pietra o laterizio	5
Struttura a sbalzo in pietra o laterizio	6
Volta appoggiata in muratura	7
Volta a sbalzo in muratura	8
Struttura appoggiata in c.a.	9
Struttura a sbalzo in c.a.	0

Strutture Orizzontali

Legno	A
Legno con catene	B
Putrelle e voltine o tavelloni	C
Putrelle e voltine o tavelloni con catene	D
Laterocemento o solette in c.a	E
Volte senza catene	F
Volte con catene	G
Miste volte-solai	H
Miste volte-solai con catene	I
Altri tipi	L

Coperture

Legno spingenti	M
Legno "poco spingenti" (vedi manuale)	N
Legno a spinta eliminata o travi orizzontali	O
Laterocemento o solette in c.a.	P
Acciaio spingenti	Q
Acciaio non spingenti	R
Miste spingenti	S
Miste non spingenti	T
Altri tipi	V

	Vert.	Scale	Oriz. e Cop.	
139				
143				
147				
151				
155				

Tipologie Strutturali — N° Piani a Tipologia Strutturale Uguale

ESTENSIONE E LIVELLO DEL DANNO

Estensione del danno (•)

	≤ 10%	1
10% <	≤ 20%	2
20% <	≤ 30%	3
30% <	≤ 40%	4
40% <	≤ 50%	5
50% <	≤ 60%	6
60% <	≤ 70%	7
70% <	≤ 80%	8
80% <	≤ 90%	9
90% <		0

Strutture Verticali

	M	E	L	N°
159				
163				
167				
171				
175				

Strutture Orizzontali

	M	E	L	N°
179				
183				
187				
191				
195				

Scale

	M	E	L	N°
199				
203				
207				
211				
215				

Livello del danno (•)

Nessun danno		A
Danno lieve	(v. manuale)	B
Danno medio	(v. manuale)	C
Danno grave	(v. manuale)	D
Danno gravissimo	(v. manuale)	E
Danno totale	(v. manuale)	F

Tamponature

	M	E	L	N°
219				
223				
227				
231				
235				

(•) I dati contrassegnati da un asterisco vanno raccolti solo se disponibili o quando sia il caso.

Fig. 3. Fiche pour le relevé de la vulnérabilité, 2e page : éléments structurels, dommages.

— pour l'âge de la construction, code 121, on adopte en général les classes d'âge considérées par l'Institut National de Statistique (ISTAT), avec la possibilité d'ajouter des classes qui aient éventuellement un certain intérêt dans la région considérée (par exemple parce qu'il y a eu un tremblement de terre à une certaine date).

La deuxième page (fig. 3) contient deux sections : la première fournit des données de vulnérabilité simples, la seconde concerne le relèvement des dommages dans les cas où la fiche est employée à la suite d'un événement sismique ; pour chaque type de structure (verticale, horizontale, escaliers, cloisons de division dans les constructions en béton armé) on indique : le niveau maximum de dommage à chaque étage (M), l'extension des dommages (E), le niveau moyen (L) ; les niveaux de dommage sont au nombre de six, indiqués par une lettre, de A à F, et ils sont définis d'une façon objective dans le manuel d'instructions : par exemple les dommages des parois principales en maçonnerie sont classifiés de la façon indiquée dans la fig. 4 et le niveau est défini par la Table 1.

TABLE 1. — DOMMAGES DES PAROIS PRINCIPALES EN MAÇONNERIE

Niveau	
B (léger)	Fissures d'ouverture jusqu'à 1 mm, de n'importe quel type
C (moyen)	Fissures du type 1, 5, 6 jusqu'à 4 mm ; ou bien du type 2, 3, 7 jusqu'à 2 mm
D (grave)	Fissures du type 1, 5, 6 jusqu'à 10 mm ; ou bien du type 2, 3, 7 jusqu'à 5 mm ; ou bien présence de dommages du type 4, 8, 9
E (très grave)	Fissures et dommages de mesures supérieures à celles du niveau D
F (destruction)	Paroi détruite, toute ou en partie

2.1.2. Niveau 2

Au niveau 2 l'intention de l'étude est celle de pousser plus à fond l'analyse de la capacité de la construction à résister aux actions sismiques. On relève donc tout d'abord toutes les données du niveau 1 et puis on cherche d'autres indications, plus détaillées.

Pour bien comprendre la logique du niveau 2 il faut une explication préliminaire sur le comportement des constructions soumises aux actions sismiques, actions qui peuvent essentiellement se schématiser en actions (ou forces) horizontales.

Considérons donc une construction très simple, à un seul étage et quatre murs seulement (fig. 5). Supposons d'abord qu'il n'y ait pas d'ouvertures, que la dalle soit détachée des murs parallèles à X et que les murs soient détachés entre eux (fig. 6). Considérons une action horizontale parallèle à X : dans les conditions supposées les deux murs orthogonaux à X se comportent

Fig. 4. Cadre des fissures possibles dans les murs.

1. *Fissures verticales au-dessus des portes et des fenêtres*
2. *Fissures obliques (≅ 45°) au-dessus et au-dessous des portes et des fenêtres*
3. *Fissures obliques dans les éléments verticaux, entre les portes et les fenêtres*
4. *Écrasement local de la maçonnerie avec désagrégation du mortier et/ou des éléments (pierres ou briques), avec expulsion éventuelle du matériau. Au début ce phénomène peut être signalé par le gonflement du crépi éventuel*
5. *Fissures horizontales au sommet et/ou au pied des éléments verticaux*
6. *Fissures verticales à l'attache des murs orthogonaux*
7. *La même chose sur toute l'épaisseur du mur*
8. *Expulsion du matériau due à poutres ou dalles*
9. *Détachement et expulsion dans la zone d'attache de deux murs orthogonaux*

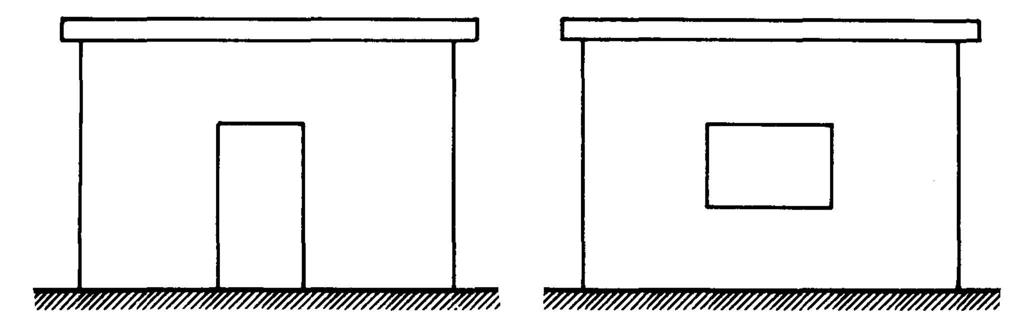


Fig. 5a. Construction simple.

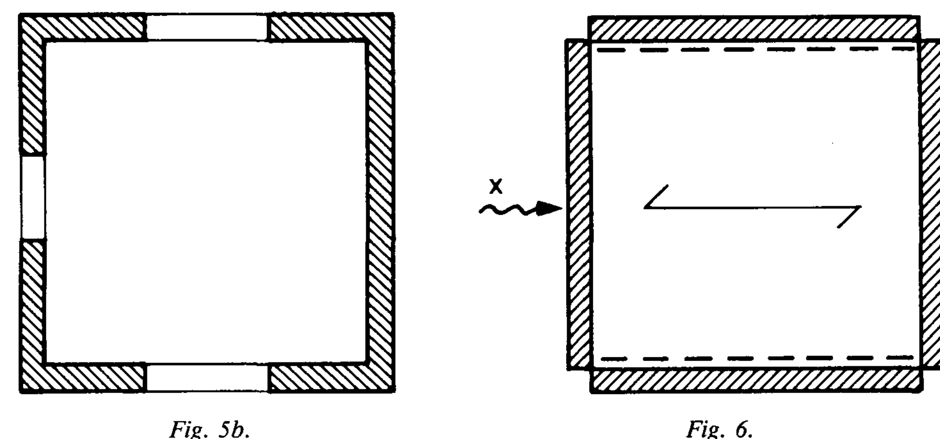


Fig. 5b.
Construction simple.

Fig. 6.
Construction simple à murs détachés.

comme des poutres en porte-à-faux, encastrés à la base (fig. 7) : leur résistance est très faible. Si on passe à une action horizontale perpendiculaire à X la situation change complètement : les actions horizontales sur la dalle sont reportées aux murs orthogonaux à X et agissent dans leur plan (fig. 8) : la résistance est grande.

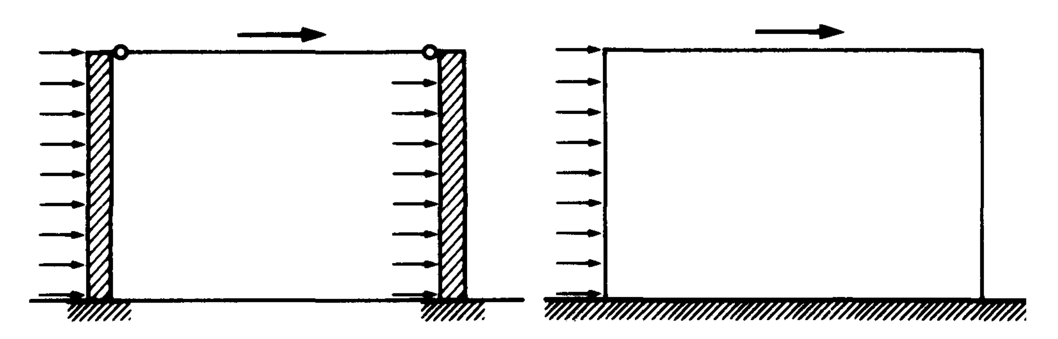


Fig. 7. Construction simple : comportement en porte-à-faux.

Fig. 8. Construction simple : action dans le plan du mur.

La situation décrite ci-dessus s'améliore d'une façon radicale si la dalle est un diaphragme rigide dans son plan et si elle est liée aux quatre murs. De cette façon les actions horizontales appliquées à la dalle sont toujours reportées aux murs parallèles aux actions elles-mêmes ; en outre, en ce qui concerne les actions appliquées directement sur les murs et transversales par rapport à ceux-ci (fig. 9), la présence de la dalle rigide transforme le mur considéré en une poutre non plus à porte-à-faux mais appuyée (ou partiellement encastrée) au sommet ; en plus, si l'on attache les murs entre eux (fig. 10), chaque mur devient une plaque partiellement encastrée sur les quatre côtés et donc le comportement devient le meilleur possible. De cette façon on obtient une « boîte » dont la résistance aux actions sismiques est en

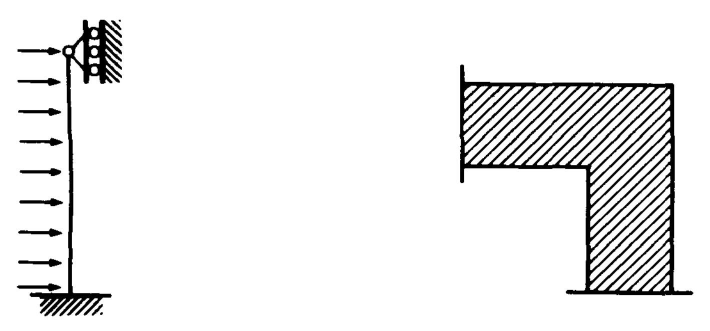


Fig. 9. Actions transversales sur un mur.

Fig. 10. Liaison des murs.

général très satisfaisante pourvu que quelques conditions supplémentaires, que nous verrons tout à l'heure, soient remplies.

Une fois que la résistance aux actions horizontales est confiée aux murs parallèles aux actions elles-mêmes, il faut examiner ce problème spécifique. En général les murs sont plutôt larges par rapport à la hauteur (fig. 11) ; dans ce cas la sollicitation principale est l'effort tranchant et la grandeur qui commande est la tension tangente (fig. 11) :

$$\tau = \frac{\Sigma F}{L.s}$$

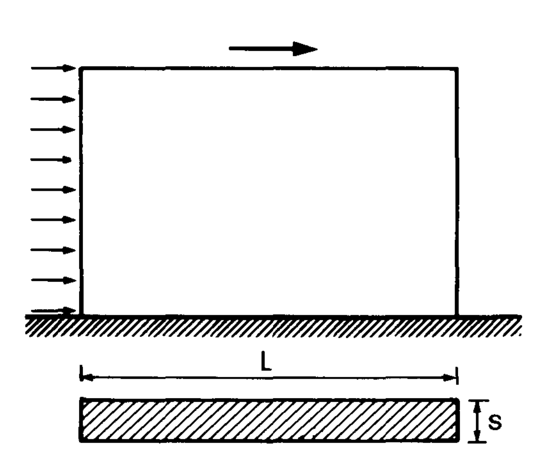


Fig. 11. Mur résistant aux actions horizontales.

On voit donc que l'épaisseur du mur est très importante et il est évident qu'un mur trop mince ne peut pas résister. Mais il y a une autre grandeur qui compte ; c'est la compression verticale σ_o. Une formule bien connue, due aux chercheurs yougoslaves Turnsek et Cacovic, indique que la résistance ultime à l'effort tranchant, τ_u, dépend de la résistance pour $\sigma_o = 0$, soit τ_k, et de la valeur de σ_o (pourvu que σ_o ne soit pas trop grand) :

$$\tau_u = \tau_k \sqrt{1 + \frac{\sigma_o}{1{,}5\ \tau_k}}$$

La résistance τ_k dépend du matériau ; elle varie entre 2 t/m^2 pour les matériaux plus faibles jusqu'à 20 ÷ 30 pour les murs plus solides. Ces valeurs peuvent (et devraient) être déterminées par des essais sur place ou au laboratoire, ou bien elles sont données par les règlements techniques.

On comprend facilement que la résistance aux actions horizontales est encore influencée par la présence dans le mur des ouvertures, portes et fenêtres (fig. 12). On a en effet une diminution immédiate exprimée par la formule suivante (fig. 12) :

$$\tau = \frac{\Sigma F}{(L - a)s}$$

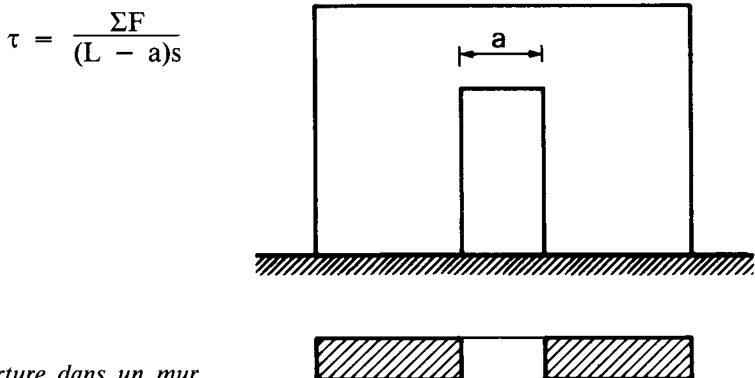


Fig. 12. Ouverture dans un mur.

En plus on a des concentrations de tensions, avec des tractions dangereuses pour des matériaux comme la maçonnerie, aux angles de l'ouverture (ce sont ces tensions qui expliquent les fissures du type 1 et 5 dans la fig. 4).

La présence des ouvertures et la grandeur de celles-ci (et même leur position, négative si elle est trop proche des attaches aux murs perpendiculaires) est donc un élément négatif qui doit être limité dans la phase de conception de l'ouvrage et considéré dans la phase d'étude.

L'influence négative des ouvertures est réduite si on met des poutres au-dessus (fig. 13) ou bien (encore mieux) si on met des cadres complets (fig. 14) constitués par du matériau plus résistant (en général, et à la traction en particulier).

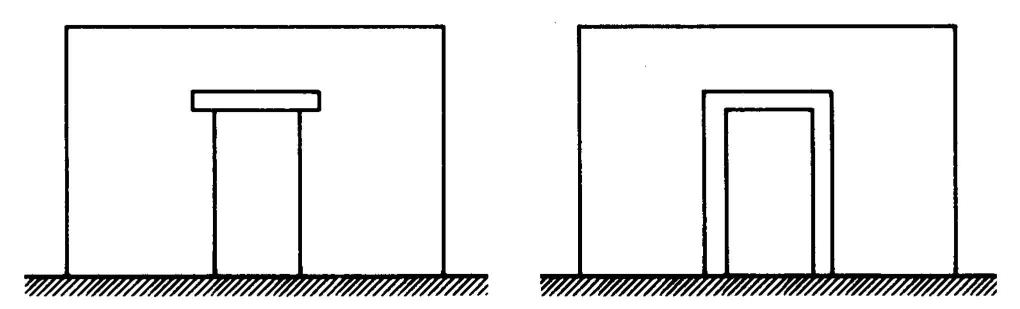


Fig. 13. Ouverture renforcée. *Fig. 14. Ouverture encadrée.*

Un autre élément important est la présence de toits, avec ou sans poussée horizontale. La situation est évidemment négative dans le cas de la fig. 15, car la force horizontale appliquée au mur par le toit s'ajoute à l'action sismique. Par contre la situation est rétablie dans le cas de la fig. 16, grâce à la présence de la « chaîne », qui élimine la poussée.

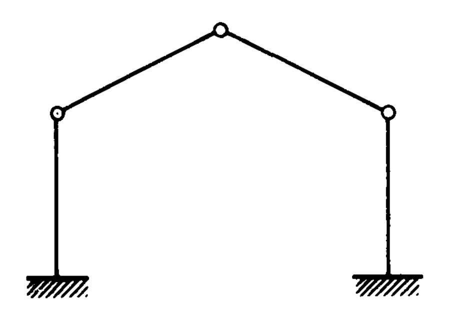


Fig. 15. Toit avec poussée.

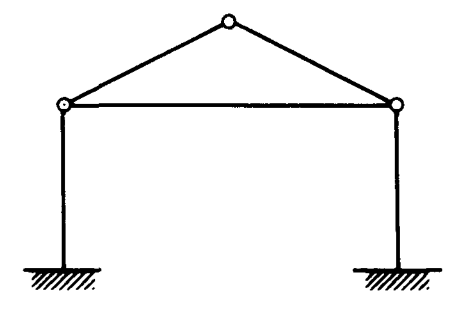


Fig. 16. Toit à poussée éliminée.

Les raisonnements que nous avons développés pour le cas d'une construction à un étage sont encore valables jusqu'à 2 ou 3 étages ; ils deviennent insuffisants si le nombre des étages devient trop grand.



La fiche au niveau 2 (page 56, fig. 17) examine donc tous les facteurs que nous avons rapidement introduits ci-dessus, plus d'autres encore, comme par exemple les masses distribuées selon la hauteur du bâtiment, ou bien la forme du plan. Plus exactement les facteurs considérés sont (fig. 17) :

1. *Le type et l'organisation du système résistant* : on contrôle si le bâtiment est une « boîte » ;
2. *La qualité du système résistant* ;
3. *La résistance conventionnelle* : on contrôle, par une méthode simplifiée, la tension τ_u possédée par le bâtiment, dans le but de la comparer à la tension provoquée par les actions sismiques prévues ;
4. *La position du bâtiment et ses fondations* : on relève des données essentielles sur le type de terrain et sa forme (inclinaisons), et sur les fondations du bâtiment ;
5. *Dalles* : on contrôle la capacité des planchers d'être des diaphragmes rigides dans leur plan ; on contrôle aussi la présence éventuelle de dalles à des hauteurs différentes, ce qui n'est évidemment pas très positif en cas de séisme ;
6. *Configuration horizontale* : on contrôle la forme du plan ;

G.N.D.T. - Scheda di Vulnerabilità (muratura e c.a.) di 2° livello **1ª Parte**

DATA [1] Giorno Mese — [4] Squadra — [7] N° Ordine — [10] Accorpamento

PARAMETRI	ELEMENTI DI VALUTAZIONE
1 TIPO ED ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA RESISTENTE (S.R.)	MURATURA [11]: Secondo normat. nuove costruzioni (cl. A) 1; Secondo normativa riparazioni (cl. A) 2; Cordoli o catene a tutti i livelli (cl. B) 3; Buoni ammorsamenti fra murature (cl. C) 4; Senza cordoli, catene o ammorsam. (cl. D) 5 — CEM. ARMATO [11]: Pareti di c.a. (cl. A) 1; Tampon. consistenti e telai (cl. A) 2; Tampon. deboli e telai rigidi (cl. B) 3; Tampon. deboli e telai defor. (cl. C) 4; Telai non tamponati (cl. B o C) 5
2 QUALITÀ DEL S.R.	(Vedi manuale) [12]
3 RESISTENZA CONVENZIONALE	Numero dei piani N [13]; Area totale coperta A_t (m^2) [15]; Area A_x (m^2) [19]; Area A_y (m^2) [22]; Minimo fra A_x e A_y A (m^2); Massimo fra A_x e A_y B (m^2); Coefficiente $a_o = A/A_t$; Coefficiente $\gamma = B/A$; Resistenza elementi τ_K (t/m^2) [25]; Altezza media interpiano h (m) [28]; Peso specifico pareti p_m (t/m^3) [30]; Carico permanente solaio p_s (t/m^2) [32]; $q = (A_x + A_y) \cdot h \cdot p_m / A_t + p_s$; Coefficiente $\alpha = C/[0.4 \cdot R^{(*)}]$ [34]; $C = \frac{a_o \cdot \tau_K}{q \cdot N} \left[\sqrt{1 + \frac{q \cdot N}{1.5 \cdot a_o \cdot \tau_K (1+\gamma)}} \right]^{(**)}$
4 POSIZIONE EDIFICIO E FONDAZIONI	Pendenza percentuale del terreno [37]; Differenza massima di quota nelle fondazioni Δ h (m) [40]; [39] Roccia, fondaz. (si) 1 (no) 2; Terr. sciolto, non spingente, fondaz. (si) 3 (no) 4; Terr. sciolto, spingente, fondaz. (si) 5 (no) 6
5 ORIZZONTAMENTI	Piani sfalsati [43] (si) 1 (no) 0; Percentuale degli orizzontamenti rigidi e ben collegati sul totale α'_o [45]; [44] Orizzontamenti rigidi e ben collegati 1; Orizzontamenti deformabili e ben collegati 2; Orizzontamenti rigidi e mal collegati 3; Orizzontamenti deformabili e mal collegati 4
6 CONFIGURAZIONE PLANIMETRICA	Rapp. perc. $\beta_1 = a/l$ [47]; Rapp. perc. $\beta_4 = \Delta d/d$ [49]; Rapp. perc. $\beta_5 = c/b$ [51]; (Muratura) Rapp. perc. $\beta_2 = b/l$ [53]; (C.a.) Rapp. perc. $\beta_3 = e/d$ [53]
7 CONFIGURAZIONE IN ELEVAZIONE	Percentuale di {aumento (+) / riduzione (−)} di massa [55]; Rapporto percentuale T/H [58]; Percentuale in superficie di portico [61]; Variazioni in elevazione del sistema resistente [60] (non significative) 0 (1 classe) 1 (2 classi) 2; Piano terra porticato [63] (si) 1 (no) 0

PARAMETRI	ELEMENTI DI VALUTAZIONE
M8 MURATURA — D_{MAX} MURATURE	Rapporto max l/s [64]
M9 MURATURA — COPERTURA	Copertura non spingente [66] 0; Cop. "poco spingente" [66] 1 spingente [66] 2; Cordoli [67] (si) 1 (no) 0; Catene [68] (si) 1 (no) 0; Peso copertura p_c (t/m^2) [69]; Lungh. d'appoggio l_a (m) [72]; Perimetro copertura l (m) [75]
PESI VARIABILI	Parametro 5 [78]; Parametro 7 [79]; Parametro M9 [80] — Peso in decimi (Es. 0,8 → 8; 1,0 → A)

PARAMETRI	ELEMENTI DI VALUTAZIONE
C8 CEMENTO ARMATO — COLLEGAMENTI ED ELEMENTI CRITICI	Percentuale $\gamma_1 = s/b$ [64]; Percentuale $\gamma_2 = e/b'_{min}$ [66]; Percentuale $\gamma_3 = e/b''$ [68]; Rapporto max h/b_{min} [70]; Rapporto percentuale σ/R_c [72]; Collegamento di elementi prefabbricati [74] (si) 1 (no) 0; Larghezza min. b_{min} (cm) [75]
C9 CEMENTO ARMATO — ELEMENTI CON BASSA DUTTILITÀ	Rapporto min. h_{min}/b [77]; Rapporto max. h_{medio}/h_{min} [79]

(*) Muratura: R = 1 c.a.: vedi manuale
(**) C.a.: Il termine sotto radice è da porre = 1

Fig. 17. Fiche pour le relevé de la vulnérabilité, 3ᵉ page : 2ᵉ niveau d'évaluation.

7. *Configuration verticale* : on contrôle la distribution en hauteur des masses et de la rigidité ;
8. *Dimension des parois* : on contrôle la dimension maximum des parois et donc leur résistance aux actions transversales à leur plan moyen ;
9. *Toits* : on contrôle le poids du toit et la présence de poussées sur les murs ;
10. *Éléments non structurels* : on contrôle les éléments non structurels dont la présence et l'état ont une influence sur le comportement du bâtiment ;
11. *Dégradation* : on contrôle l'état de la construction et les dommages (anciens) présents.

Pour chaque paramètre considéré on détermine une classe parmi 4 possibilités, A étant la classe la meilleure et D la pire. À chaque classe on attribue une note, égale à zéro pour la classe A qui est « parfaite » au point de vue sismique ; à certains paramètres on attribue en outre un poids variable, calculé chaque fois à partir des éléments relevés. La somme des notes, éventuellement multipliées par leur poids, donne au total une note globale pour le bâtiment, qui exprime d'une façon numérique la *vulnérabilité*. Cette note peut s'associer à une courbe de la fig. 1, pourvu naturellement que l'on ait procédé (c'est une tâche des chercheurs) à des *calibrations*. Ces calibrations sont encore à l'étude : en particulier on profite des tremblements de terre plus récents pour comparer les notes de vulnérabilité obtenues pour chaque paramètre avec les dommages relevés sur les bâtiments des zones affectées.

2.1.3. Élaborations

Les données de vulnérabilité et d'exposition contenues dans les fiches permettent une série de calculs très intéressants.

Tout d'abord on peut calculer le risque sismique et l'indiquer sur des cartes (cartes de risque) en utilisant les courbes de la fig. 1 et les données sur la sismicité de la zone étudiée.

Les cartes de risque sismique permettent de connaître d'une façon précise et quantifiée la situation (ou les situations) que l'on doit attendre à la suite d'un tremblement de terre possible dans la région considérée : c'est le (ou les) *scénario sismique*. On peut alors, grâce aux données des fiches :

— se préparer à affronter ces situations avant qu'il soit possible de les corriger (politique immédiate) ;
— commencer à corriger les plus gros et les plus graves défauts (politique à moyen terme) ;
— établir une politique de mitigation des effets à long terme, définitive ;
— connaître les exigences techniques et économiques de cette politique : en particulier connaître les types d'intervention nécessaires et les coûts ;

— établir des stratégies d'intervention pour optimiser les ressources disponibles ;
— établir les procédures d'intervention, les codes techniques, les procédés financiers, etc. ;
— établir les priorités.

Les élaborations ci-dessus peuvent se faire :
— à un niveau plus grossier au moyen des fiches de niveau 1 ;
— à un niveau beaucoup plus précis, au moyen des fiches du niveau 2.

Il est toutefois possible, grâce à des études de comparaison, de projeter sur une population (de bâtiments) plus large des résultats de niveau 2 obtenus sur un échantillon plus petit tandis que le relèvement général est au niveau 1.

2.2. Biens culturels — monuments

Pour les monuments dont la typologie s'éloigne sensiblement de la « boîte » que nous avons étudiée dans le paragraphe précédent, la fiche du GNDT perd sa valeur. En particulier les monuments sont souvent caractérisés par la présence d'arcs, de voûtes, de parois de dimensions très grandes ; les diaphragmes horizontaux rigides sont bien souvent absents. Par contre la qualité des matériaux et de la construction est souvent meilleure que celle des bâtiments ordinaires. Il faut donc penser à une modification spécialisée de la fiche, question qui est à l'étude au CNPPCRS (Comitato Nazionale per la Prevenzione del Patrimonio Culturale dal Riscio Sismico).

3. Réduction de la vulnérabilité

L'examen des paramètres de vulnérabilité prévus par le relèvement au niveau 2 indique en termes généraux quels sont les procédés à suivre pour réduire la vulnérabilité sismique d'un bâtiment : il s'agit évidemment d'améliorer la classe de chaque paramètre en essayant de revenir à la classe A.

On cherchera donc selon les cas :
— à redonner au bâtiment la bonne organisation structurelle générale « à boîte », ce qui s'obtient en refaisant ou en renforçant les planchers, en liant les parois entre elles avec des poutres de bord ou des chaînes ou tirants ;
— en améliorant la qualité et la résistance des murs avec des techniques d'injection de mortier ou résines, ou bien en ajoutant des plaques minces de béton armé, ou encore en refaisant certains murs ;
— en renforçant les fondations ;
— en ôtant certaines masses excessives et parfois les derniers étages ;
— en ajoutant des parties de structure, murs ou dalles ;

— en refaisant les toits ou bien en ajoutant des chaînes qui éliminent les poussées ;
— en réparant les parties détériorées.

Les problèmes sont assez faciles, sauf dans les aspects économiques (qui conseillent parfois la démolition et la reconstruction) tant qu'il s'agit de bâtiments ordinaires, les techniques étant désormais bien établies et connues, grâce à l'expérience du Friuli, de la Valperina et, plus récemment, de l'Irpinia.

Mais les problèmes deviennent très délicats et souvent difficiles sinon impossibles dans le cas des monuments, cas dans lequel l'application des techniques standards peut donner des résultats aussi inutiles qu'inacceptables au point de vue culturel.

Le problème de la réduction de la vulnérabilité sismique des monuments peut se résoudre en suivant avec grande attention le schéma logique suivant :
— d'abord *comprendre* comment le monument se comporte en cas de séisme ;
— ensuite redonner à la construction sa *résistance originale*, souvent perdue à cause de la dégradation et des dommages subis ;
— ensuite *corriger*, si possible, les *erreurs* éventuelles ;
— ne *jamais* faire de *violences structurelles*, sauf dans des cas spéciaux dans lesquels ils convient alors de dénoncer clairement l'intervention ;
— ne jamais entreprendre un projet sans avoir effectué une *étude complète de la construction* : historique (sismique, évolutive, fonctionnelle, etc.), architecturale, structurelle, des matériaux, des méthodes de construction ;
— affronter tous les problèmes suivant une pratique *interdisciplinaire*.

C'est peut-être là, dans la pratique de l'étude *interdisciplinaire*, que se cache le secret du succès pour toute politique d'intervention sur les biens culturels, dans les zones sismiques comme ailleurs.

Carlo GAVARINI
Via Valnarane, 107
I - 00184 ROMA